

Визначення коефіцієнта заповнення порожнини нафтопроводу з урахуванням особливостей гідродинамічних параметрів безнапірних ділянок

© С.Я. Григорський
канд. техн. наук
М.Д. Середюк
д-р техн. наук
tzng@nung.edu.ua
ІФНТУНГ

УДК 622.692.4

Наведено метод розрахунку коефіцієнта заповнення порожнини нафтопроводу за наявності самотливих ділянок. Розроблено оригінальне програмне забезпечення, яке дає змогу визначати об'єм нафти, що знаходиться в трубопроводі, та складати матеріальний баланс нафти. Проведено апробацію запропонованого методу на одній із експлуатаційних ділянок магістрального нафтопроводу «Дружба».

Ключові слова: перевальна точка, самотлива ділянка, ступінь заповнення перерізу труби, безнапірний потік рідини.

Приведен метод расчета коэффициента заполнения полости нефтепровода при наличии самотечных участков. Разработано оригинальное программное обеспечение, которое позволяет определять объем нефти, находящейся в трубопроводе, и составлять материальный баланс нефти. Проведена апробация предложенного метода на одном из эксплуатационных участков магистрального нефтепровода «Дружба».

Ключевые слова: перевальная точка, самотечный участок, степень заполнения сечения трубы, безнапорный поток жидкости.

The method of calculation of the void space filling rate for an oil pipeline in presence of gravity sections is given. The original software is developed to allow determination of the amount of oil that is in the pipeline and making of the material balance of the oil. The method proposed is tested on one of the operating areas of the Druzhba main oil pipeline.

Key words: transshipment point, gravity section, degree of filling of a pipe cross section, free-flow stream of liquid.

Значна частина вітчизняних нафтопроводів проходить у гірській місцевості і характеризується пересіченим профілем траси. На таких нафтопроводах, окрім напірних, мають місце безнапірні (самотливі) ділянки руху нафти. На відміну від ділянок із напірним рухом рідини, самотливі ділянки працюють із неповним заповненням перерізу труби транспортованою рідиною. У цьому випадку реалізуються режими перекачування із так званою перевальною точкою. Від перевальної точки до кінця ділянки трубопроводу нафта або нафтопродукт можуть бути транспортовані за заданої витрати без додаткових витрат енергії за рахунок різниці геодезичних позначок перевальної і кінцевої точок траси [1, 2].

Тиск у парогазовій порожнині безнапірної ділянки залишається практично сталим і рівним пружності насиченої пари транспортованого продукту за температури перекачування. Тому лінія гідравлічного нахилу на самотливій ділянці проходить паралельно профілю траси на віддалі, що залежить від пружності насиченої пари та густини нафти або нафтопродукту [3, 4].

Часті зміни схем роботи насосів на нафтоперекачувальних станціях призводять до суттєвих змін робочої витрати нафти, що в свою чергу спричинює виникнення або ліквідацію самотливих ділянок. Такі

нештатні ситуації значно ускладнюють експлуатацію магістральних нафтопроводів.

У процесі експлуатації магістральних нафтопроводів з безнапірними ділянками важливо контролювати об'єм нафти, який знаходиться у порожнині трубопроводу в будь-який момент часу.

Як показали наші дослідження, кількість самотливих ділянок, місце їх розташування на трасі трубопроводу, ступінь заповнення перерізу рідиною функціонально пов'язані між собою і визначаються продуктивністю трубопроводу та режимом перекачування нафти [3–5].

Метою роботи є розробка математичних моделей для розрахунку коефіцієнта заповнення магістрального нафтопроводу із самотливими ділянками залежно від витрати та в'язкості нафти.

У ході досліджень вирішували такі завдання:

- виявлення взаємозв'язку між коефіцієнтом заповнення нафтопроводу і величиною витрати та кінематичної в'язкості нафти в трубопроводі;
- розроблення аналітичних залежностей та програмного забезпечення для розрахунку коефіцієнта заповнення порожнини магістрального нафтопроводу;
- апробація розроблених математичних моделей на прикладі однієї з експлуатаційних ділянок вітчизняного нафтопроводу «Дружба» із самотливими ділянками.

Об'єкт дослідження – гідродинамічні процеси на напірних і безнапірних ділянках рельєфних магістральних нафтопроводів.

Предмет дослідження – рельєфні магістральні нафтопроводи із самопливними ділянками.

Методи дослідження – математичне моделювання параметрів роботи магістральних нафтопроводів із самопливними ділянками з використанням комп'ютерних технологій.

Методика, що пропонується нижче, дає змогу виразити величину коефіцієнта заповнення внутрішньої порожнини магістрального нафтопроводу із самопливними ділянками як функцію витрати та кінематичної в'язкості рідини в трубопроводі. Вона базується на результатах раніше виконаних нами досліджень щодо визначення кількості, місця розташування самопливних ділянок на трасі нафтопроводу [2], впливу самопливних ділянок на пропускну здатність нафтопроводу [4], а також на застосуванні одержаних залежностей ступеня заповнення самопливних ділянок від витрати і режиму руху нафти в нафтопроводі [3]. Ступінь заповнення перерізу самопливної ділянки нафтою так залежить від центрального кута φ , за яким видно поверхню рідини в трубопроводі [1]:

$$\sigma = \frac{\varphi - \sin \varphi}{2\pi} \quad (1)$$

Свою чергою значення кута φ може бути визначене шляхом розв'язування рівняння для коефіцієнта γ , що характеризує інтенсивність втрати енергії рідини на цій самопливній ділянці [3]

$$\gamma = \frac{\alpha^{m+1}}{\left[\alpha - \frac{\sin(2\pi\alpha)}{2\pi} \right]^3} \quad (2)$$

де m – показник режиму руху рідини у формулі Лейбензона, α – відносний кут заповнення перерізу безнапірної ділянки:

$$\alpha = \frac{\varphi}{2\pi} \quad (3)$$

За відомого значення коефіцієнта γ для знаходження кута φ доцільно застосовувати формули (9)–(12), які одержані шляхом математичного моделювання гідродинамічних параметрів самопливних ділянок у зоні гідравлічно гладких труб турбулентного режиму [3].

Нехай траса нафтопроводу складається із n висхідних і низхідних ділянок. У будь-який момент експлуатації нафтопроводу на трасі формуються k самопливних ділянок із безнапірним рухом нафти. Зазвичай самопливна ділянка може займати частину низхідної ділянки нафтопроводу.

Коефіцієнт заповнення нафтопроводу визначають як відношення об'єму нафти, що знаходиться в трубопроводі, до геометричного об'єму порожнини нафтопроводу

$$\psi = 1 - \frac{\sum_{j=1}^k (1 - \sigma_j) \beta_j V_j}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (4)$$

де V_i – геометричний об'єм порожнини i -тої ділянки нафтопроводу; V_j – геометричний об'єм порожнини низ-

хідної ділянки, на якій сформувалася j -та самопливна ділянка нафтопроводу; σ_j – ступінь заповнення перерізу j -тої самопливної ділянки нафтою; β_j – відносна довжина самопливної ділянки на j -тій ділянці нафтопроводу;

$$\beta_j = \frac{L_{sj}}{L_j} \quad (5)$$

L_{sj} – довжина j -тої самопливної ділянки; L_j – загальна довжина j -тої ділянки із напірним і безнапірним рухом нафти.

Залежність коефіцієнта заповнення порожнини нафтопроводу нафтою від витрати і фізичних властивостей транспортованої нафти носить індивідуальний характер і визначається особливостями траси трубопроводу. Тому для одержання конкретних результатів одну із ділянок нафтопроводу «Дружба» приймаємо як модельний нафтопровід.

Для отримання аналітичної залежності коефіцієнта заповнення нафтопроводу «Дружба» від витрати та в'язкості нафти за допомогою програми Samopliv проведено багатоваріантні розрахунки всіх можливих режимів його роботи. Програму Samopliv розроблено у середовищі Visual Basic із застосуванням електронних таблиць Microsoft Office Excel для введення вихідних даних та виведення результатів розрахунку. В обчислювальний алгоритм закладено методики [2, 4], за допомогою яких визначають кількість, положення, довжину самопливних ділянок та пропускну здатність нафтопроводу. Для розрахунку величини ступеня заповнення перерізу безнапірних ділянок застосовують аналітичні залежності, отримані в роботі [3].

Як вихідні дані для розрахунку коефіцієнта заповнення нафтопроводу «Дружба» із самопливними ділянками приймали такі значення фізичних величин:

густина нафти $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$;

діапазон зміни кінематичної в'язкості нафти $\nu = (10 \div 40) \text{ сСт}$;

середнє значення тиску насичених парів нафти за Рейдом $P_{s38} = 50 \text{ кПа}$;

установка тиску САР на виході НПС $P_{\text{доп}} = 4,4 \text{ МПа}$;

технологічно необхідний тиск нафти в кінці нафтопроводу $P_{\text{кн}} = 0,2 \text{ МПа}$.

У результаті досліджень виявлено, що для ділянки нафтопроводу «Дружба» максимальна кількість самопливних ділянок – 6. Для кожного режиму роботи нафтопроводу існує така продуктивність, за якої переріз нафтопроводу заповнений повністю, тобто відсутні ділянки з безнапірним рухом рідини. Отримані такі значення витрати нафти, за яких відбувається зміна кількості самопливних ділянок:

$$\begin{cases} k=6: & Q < Q_{6-5}; \\ k=5: & Q_{6-5} \leq Q < Q_{5-4}; \\ k=4: & Q_{5-4} \leq Q < Q_{4-3}; \\ k=3: & Q_{4-3} \leq Q < Q_{3-2}; \\ k=2: & Q_{3-2} \leq Q < Q_{2-1}; \\ k=1: & Q_{2-1} \leq Q < Q_{1-0}; \\ k=0: & Q \geq Q_{1-0}, \end{cases} \quad (6)$$

де Q – продуктивність (об'ємна витрата нафти в нафтопроводі); $Q_{(k)-(k-1)}$ – перехідне значення продуктив-

ності нафтопроводу, за якого відбувається зменшення кількості самопливних ділянок на одну, тобто від k до $(k-1)$.

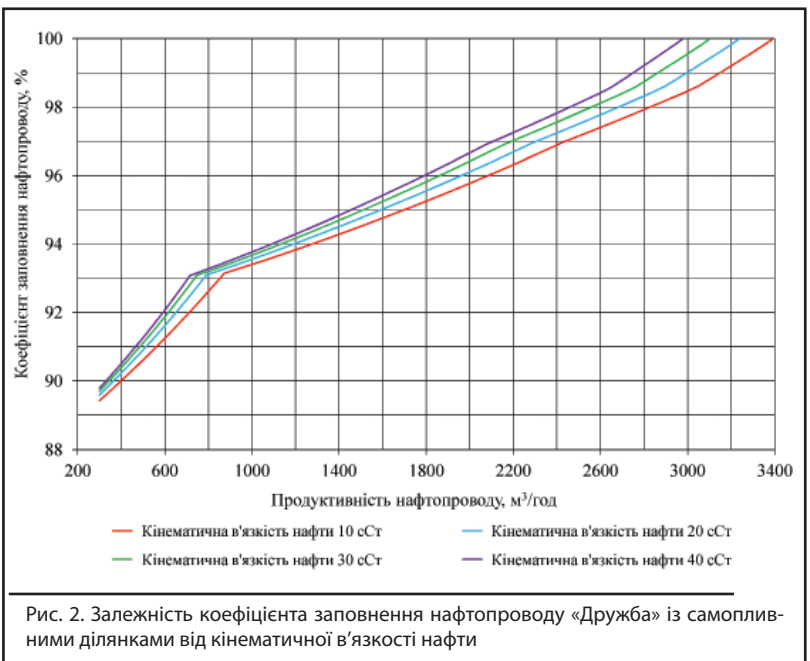
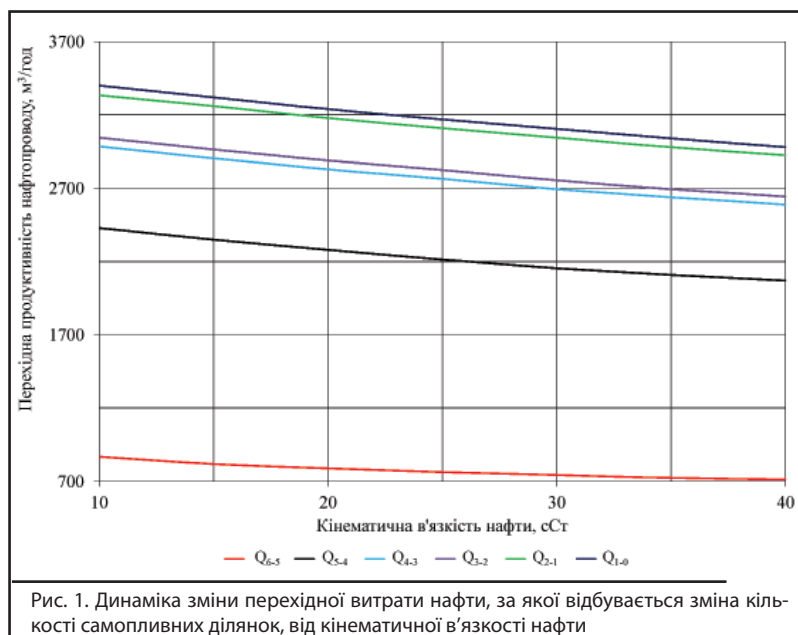
Наприклад, значення продуктивності нафтопроводу Q_{3-2} відповідає випадку, коли кількість безнапірних ділянок зменшується від трьох до двох. Значення продуктивності Q_{1-0} відповідає ситуації, коли на трасі трубопроводу зникають самопливні ділянки. Зрозуміло, що з точки зору безпечності експлуатації нафтопроводу та складання матеріального балансу нафти доцільними є режими роботи, за яких трубопровід працює з продуктивністю, більшою за Q_{1-0} . Тому для оптимізації роботи магістральних нафтопроводів із пересіченим профілем траси необхідно реалізовувати режими роботи з якомога більшою продуктивністю, тобто працювати із більшим ступенем завантаження.

Опрацювавши масив результатів розрахунків перехідних витрат нафти ($\text{м}^3/\text{год}$), за яких відбувається зменшення кількості безнапірних ділянок, ми отримали такі аналітичні залежності для їх розрахунку залежно від розрахункової кінематичної в'язкості нафти ν (сСт):

$$\begin{cases} Q_{6-5} = 0,1238\nu^2 - 11,19\nu + 966; \\ Q_{5-4} = 0,1595\nu^2 - 20,01\nu + 2615; \\ Q_{4-3} = 0,1143\nu^2 - 18,93\nu + 3163; \\ Q_{3-2} = 0,1024\nu^2 - 18,51\nu + 3220; \\ Q_{2-1} = 0,0881\nu^2 - 18,15\nu + 3509; \\ Q_{1-0} = 0,0881\nu^2 - 18,37\nu + 3575. \end{cases} \quad (7)$$

Ступінь вірогідності апроксимації математичних моделей (7) перевищує 0,99, що свідчить про їхню адекватність та можливість практичного застосування.

На рис. 1 наведено відповідні графічні залежності перехідної витрати нафти від кінематичної в'язкості



транспортованої нафти. Як бачимо, перехідна витрата нафти монотонно зменшується зі збільшенням в'язкості транспортованої нафти. Це пояснюється тим, що зі зростанням в'язкості крутизна лінії гідравлічного нахилу збільшується і, відповідно, зменшується довжина самопливної ділянки. Тому для зимових умов перекачування зміна кількості самопливних ділянок буде відбуватися за менших значень витрати нафти порівняно із літніми умовами.

Із використанням формули (4) за допомогою програми Samopliv розраховано величину коефіцієнта заповнення нафтопроводу ψ для всіх можливих режимів його роботи за різного ступеня завантаження та кінематичної в'язкості нафти. На рис. 2 наведено одержану графічну залежність. Із рис. 2 можна зробити висновок, що коефіцієнт заповнення цієї ділянки нафтопроводу змінюється від 89,5 % за неповного завантаження до 100 % за умов повного завантаження системи. При цьому графічна залежність коефіцієнта заповнення нафтопроводу від витрати представляє собою ламану з криволінійних відрізків, яка монотонно зростає. Точки зламів відповідають стрибкоподібному зменшенню кількості самопливних ділянок на одиницю. Найбільш стрімко коефіцієнт заповнення внутрішньої порожнини нафтопроводу зростає під час завантаження трубопроводу. Це пояснюється особливістю траси нафтопроводу. Безнапірна ділянка, яка зникає першою зі збільшенням витрати нафти, має найбільшу довжину, порівняно з іншими самопливними ділянками. За більших витрат швидкість зростання коефіцієнта заповнення нафтопроводу є меншою. Це зумовлено особливостями траси нафтопроводу та малими значеннями відносною довжини самопливних ділянок.

Установлено, що залежність коефіцієнта заповнення нафтопроводу від

витрати найбільш адекватно можна описати за допомогою такої поліноміальної моделі:

$$\psi = A_v Q^2 + B_v Q + C_v, \quad (8)$$

де A_v , B_v , C_v – коефіцієнти математичної моделі, які є функцією кінематичної в'язкості транспортованої нафти ν (сСт), визначаються за формулами:

- якщо $Q < Q_{6-5}$

$$\begin{cases} A_v = -6,233 \cdot 10^{-10} \nu^2 + 5,959 \cdot 10^{-8} \nu + 1,010 \cdot 10^{-6}; \\ B_v = -1,967 \cdot 10^{-7} \nu^2 + 3,528 \cdot 10^{-5} \nu + 4,378 \cdot 10^{-3}; \\ C_v = -10^{-4} \nu^2 + 6,5 \cdot 10^{-3} \nu + 87,82; \end{cases} \quad (9)$$

- якщо $Q_{6-5} \leq Q < Q_{5-4}$

$$\begin{cases} A_v = 1,081 \cdot 10^{-10} \nu^2 - 3,209 \cdot 10^{-9} \nu + 3,197 \cdot 10^{-7}; \\ B_v = -4,043 \cdot 10^{-7} \nu^2 + 3,139 \cdot 10^{-5} \nu + 1,198 \cdot 10^{-3}; \\ C_v = 1,429 \cdot 10^{-4} \nu^2 - 8,429 \cdot 10^{-3} \nu + 91,71; \end{cases} \quad (10)$$

- якщо $Q \geq Q_{5-4}$

$$\begin{cases} A_v = 2,214 \cdot 10^{-10} \nu^2 - 7,136 \cdot 10^{-9} \nu + 1,246 \cdot 10^{-6}; \\ B_v = -1,171 \cdot 10^{-6} \nu^2 + 7,878 \cdot 10^{-5} \nu - 4,582 \cdot 10^{-3}; \\ C_v = 1,562 \cdot 10^{-3} \nu^2 - 0,1217 \nu + 100,5. \end{cases} \quad (11)$$

При цьому найбільша точність розрахунку коефіцієнта заповнення нафтопроводу за формулою (8) забезпечується під час розбиття на інтервали, що вказані вище. Максимальне відхилення величини коефіцієнта заповнення трубопроводу, яке розраховане за математичною моделлю (8), від фактичного значення, отриманого за програмою Samopliv, не перевищує за

абсолютною величиною 0,1 %. Таким чином, використовуючи формулу (8), з урахуванням виразів (9)–(11), можна достатньо точно знайти коефіцієнт заповнення нафтопроводу та скласти матеріальний баланс нафти в його порожнині.

Висновки

Установлено, що величину перехідної витрати нафти, за якої змінюється кількість самопливних ділянок нафтопроводу, можна адекватно описати поліномом другого степеня як функцію кінематичної в'язкості нафти. При цьому в зимових умовах можна досягти більшого заповнення порожнини нафтопроводу за менших значень продуктивності порівняно з літніми умовами перекачування.

Отримано математичну модель коефіцієнта заповнення трубопроводу як функцію витрати нафти та кінематичної в'язкості, яка з точністю до 0,1 % дає змогу оперативно визначати кількість нафти, що знаходиться у певний момент часу в порожнині ділянки нафтопроводу «Дружба».

Метод визначення коефіцієнта заповнення нафтопроводу та розроблене оригінальне програмне забезпечення Samopliv може бути використано для розрахунку об'єму нафти, що знаходиться в порожнині будь-якого магістрального нафтопроводу із самопливними ділянками.

У подальшому планується розробити метод визначення маси нафти в трубопроводі з урахуванням впливу коефіцієнта заповнення нафтопроводу, робочого тиску та температури перекачування нафти.

Список використаних джерел

1. **Лурье М.В.** Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М.В. Лурье. – М.: Нефть и газ, 2003. – 335 с.
2. **Григорський С.Я.** Визначення положення та ступеня заповнення самопливних ділянок магістральних трубопроводів / С.Я. Григорський, М.Д. Середюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – № 4 (45). – С. 198–209.
3. **Середюк М.Д.** Дослідження залежності ступеня заповнення самопливних ділянок від витрати і режиму руху нафти в трубопроводі // М.Д. Середюк, С.Я. Григорський // Нафтогазова енергетика: всеукр. наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ. – 2014. – № 2 (22). – С. 98–104.
4. **Григорський С.Я.** Визначення пропускної здатності магістральних нафтопроводів з урахуванням гідравлічного опору самопливних ділянок // С.Я. Григорський, М.Д. Середюк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 3 (52). – С. 116–127.
5. **Середюк М.Д.** Методика оперативного контролю балансу транспортованої рідини в рельєфному магістральному трубопроводі / М.Д. Середюк, С.Я. Григорський // Мат. Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова освіта та наука: стан та перспективи». – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – С. 241–243.

У Європі зросло споживання ЗПГ

За інформацією Єврогазу, асоціації європейських газорозподільних організацій, у 2015 р. обсяги споживання газу в Європі порівняно з попереднім роком збільшилися на 4 %. Це відбулося вперше за останні чотири роки.

Лева частка зростання припадає на зріджений природний газ (ЗПГ). Так, обсяги імпорту ЗПГ у Нідерландах майже подвоїлися, а в Італії збільшилися на 34 %. Основними чинниками зростання споживання газу стали погодні умови та прискорення економічного розвитку в таких країнах, як Чеська Республіка, Франція і Словаччина. Через падіння цін на газ його стали більше використовувати для виробництва електроенергії у Великій Британії, Італії та Греції.

За матеріалами <http://www.lngworldnews.com/eurogas-european-lng-imports-up-with-rising-gas-consumption>